

# 簡単な星の話

——林先生との研究——

佐藤 文隆\*

## 林教授年頭教書

私が院生の頃から6~7年の間、林先生は新年(1月)の最初の研究室のコロキウムで“年頭教書”なる話をする習わしになっていた。アメリカ大統領の年頭教書に似たものである。

林研の部屋は京大物理教室の北館の屋上に急造されたバラックのような所で、先生の部屋も大して広くなかったが、コロキウムは何時もその部屋にギュウギュウつまったかたちで行われた。膝を寄せあってといった雰囲気でした。

ある年の年頭教書で林先生は次のような話をしたと記憶している。“越えられない山があればトンネルをあけねばならない”と、いろんな問題に関係する重要な難題があって、何時もそれを避けてばかりいてはだめだという意味だったと思う。しかし、後になって、還暦を迎えられた時の“対談”(「自然」(中央公論社)1980年8月号)で確認を求めたら、「覚えてない」ということでした。教訓などというのは聞く方が勝手に解釈することなのかも知れない。

## 1. ビッグバン元素合成、星の不安定領域

私は長いこと林先生の近くで研究をする幸運に浴しながら共著の論文は一編しかありません。しかし、先生から受けた指導は、単に相対論とか宇宙論の方に目を向けさせて頂いたという大筋での指導だけでなく、1960年代においては“手とり足とり”のものでした。とりわけ、細かい内容にまでわたって林先生と関係があったのは「ビッグバン後の元素合成」と「星の不安定領域」についての研究です。ともに、1960年代の中頃のことで、1964年にD3の途中で助手にもらったので、何か先生の研究のお手伝いをしなければならないという気がこちらにも強くあったからかも知れません。私はそれまで宇宙線起源、電波源、QSOのモデルなどをわたり歩いていました。

「ビッグバン後の元素合成」については、先生の示唆で1965年の3K放射発見以前に手がけていたにもかかわらず大魚を逃がしました。この話はすでに、林先生がエディントン賞を受賞された時に「天文月報」が行った

特集の原稿として書かせていただいていますのでここでは繰り返さないことにします。「天文月報」63(1970年),92頁(4月号)に載っています。

以下ではもう一つの方の話をさせていただきます。

## 2. グローバルにみた星の進化

その頃(1964~66年)、林研のコロキウムでは星の進化の話が多く、1つは“advanced phase”, もう一つは“原始星”でした。それでも杉本さんが名古屋に移ったりしたので、やや雰囲気が変わりつつあった。原始星に重点が移りつつあったと思う。大学院に入って以来、UV図による星の構造の話を年中聞いていた。その問題にはそれ一本で弟子入りしなければ理解できないもののように思われました。

そこで“星”から離れていたのですが、次のようなわけで私も星を扱うことになった。それは準星(QSO)のモデルとしてホイルとファウラーとが提唱した超重質量星(Supermassive star)を扱うことになったからです。宇宙線→シンクロトロン放射→電波銀河→超重質量星→重力崩壊・ブラックホール→一般相対論。このルートで星及びそれを通りこして一般相対論にまで興味がひろがったわけです。その頃の“流行”のメーカーはホイルとファウラーで私もその影響で、彼らの尻軽にのっただけといえます。

林先生の所には、CaltechのOrange Aidのプレブリントが何時もきていました。そこがホイル-ファウラーの活躍の場であった。林先生はその関係のプレブリは私のところに最初に手渡してくれました。コピーが容易でない時代なので、それを何時も急いで読んだのを覚えています。

超重質量星に話をもどします。この星の話に入るとまずエディントンモデルというのが出てくる。質量をパラメータにして大幅に変えるので半径や温度といった量も解析的に書いておかねばならないが、このモデルではそれが出来る。そこで、“Core-envelope”の“fitting”にはいささか食わず嫌いで近づけなかったが、この星は何んとか扱えた。それとともに、通常の質量の星から $10^8 M_{\odot}$ といった超重までの広い範囲にわたる星のグローバルな性質が急に見えてきた。単ポリトロプの単純な構造の星についてだけではあるが、何か急に「星のことはこれで分った」といった気分になったものである。最近では、大学院生に星の進化を講義する立場になったが、

\* 京大理 Humitaka Sato: Simple theory of Stellar Structure—Research with professor Hayashi—

正直いって私の星の知識は上の場合以上には今でもでないのです。

林先生は NASA のコンピュータ IBM 7090 で計算させた有限温度のフェルミ-ディラック関数のアウト・プットを持っていました。また、それを数値計算するプログラムを皆んなに見せておられた。電子計算機事始めの頃である。

もう一つ、伏線話をすると、その頃ゼルドビッチ-ノビコフによるコンパクト星やブラック・ホールなどについての総合報告が出た。(後に彼らの単行本の一部となっている。)ここに書かれている星の解説はいたく私の趣味に合っていた。特に彼らがよく作っている、中心の密度と圧力を与えると質量が決まるという関係

$$M = \left[ \frac{1}{4\pi G^3} \frac{P_0^3}{\rho_0^4} \right]^{1/2} \varphi_N$$

は大変気に入った。 $\varphi_N$  はポリトロープ  $N$  でできる数係数。

この関係を温度ゼロの縮退星に用いればチャンドラセカル質量が出る。では、せっかく有限温度のフェルミ-ディラック関数があるのだから、それを入れてみればどうなるか? これは仕事になると思い、やり出した。温度一定を結んだり、エントロピー一定を結んだり、あれこれやった。今でも“未発表”のコンピュータのアウトプットがある。何故か私は  $T \rightarrow \infty$  とかの極限にだけ興

味をもっていて、その漸近形などを計算した“原稿”も持っている。“極限”に傾くのは例によって計算機でトラブルのを恐れて、なんとか手でやろうとするからです。

この話に林先生に結着をつけていただいたのが、K. Takarada, H. Sato and C. Hayashi "Central Temperature and Density of Stars in Gravitational Equilibrium" Prog. Theor. Phys. **36** (1966), 504 であります。林先生が持っていたアウト・プットを用いて手で数値計算の方が早かったようである。計算は宝田君が全部やった。これはスッキリした論文なので、私があればこれやっていた計算は全て“未発表”にしてしまった。

この星構造論の最初に書かれてもよいようなこの論文が何故この時期に書かれたのかは、フェルミ-ディラック関数を計算機にやらしたということもあるが、もう一つはこの頃高まっていた星の進化や構造についてのグローバルな性質を把みたいという要求に沿っていたためともいえます。ともかく私自身はずい分この図(図 1)でスッキリしました。

この図には“不安定領域”が斜線で示してあります。実はこの部分は私が計算したもので、この少し前の私の学位論文“General Relativistic Instability of the Supermassive Stars”, Prog. Theor. Phys. **35** (1966), 241 で最初に示したものです。

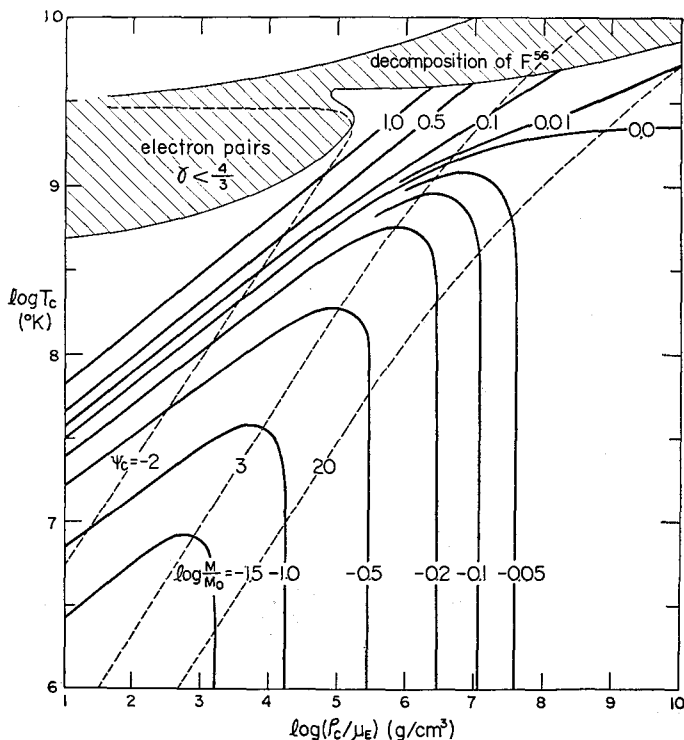


図 1 中心温度  $T_c$ -中心密度  $\rho_c$  図上に質量  $M$  が一定の平衡線を描いたもの。  $M_0$  はほぼ Chandrasekhar 質量にあたる。(Takarada, Sato and Hayashi (1966) が出典)

3. QSO のエネルギー源: 電子対創生

再び超重質量星の話に戻る。そしてさらに QSO のモデルにまで戻す。QSO での驚きはそのエネルギーの大きさである。10<sup>60</sup> erg という数字が当時よくいわれた。これは超新星 10<sup>8</sup>~10<sup>10</sup> 個分にあたる。銀河核で短かいタイム・スケール(≪10<sup>4</sup> y)でこれだけの数の超新星を爆発させるメカニズムとしては“形成時がそろっている”とか“1つの爆発が他を誘発する”とかが考えられた。日本でもその頃(1963~64年)いろいろなアイデアが出された。林先生も超重質量星中での白色矮星のいっせいフラッシュとか超重質量原始星とかのアイデアを出したと私の古いメモに書いてある。ともかく星だけではだめで、濃いガスの中に星を入れる必要がある。それは原子炉のようだと言谷三男先生が言い出されて“パイル理論”といった名前も登場した。超重質量星のモデルは超新星の連鎖爆発がむづかしいので一つの大きな星にしてしまったものといえる。

ところがこの星からエネルギーをどう取り出すかめぐっていろいろな混乱があった。その一つが電子対発生に伴って星のエネルギーがプラスになり、それで飛び散れば爆発だという珍説がまず登場した。結合エネルギー

$$Q = \int \epsilon dV - G \int \frac{M_r}{r} dM_r = U - \Omega$$

は確かに超重質量星のような輻射圧優性では

$$|Q|/\Omega \approx \beta \equiv P_g/P_t \ll 1$$

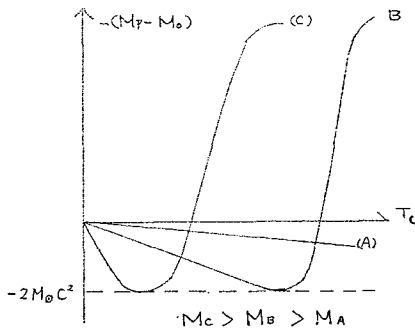


図2 Supermassive star の結合エネルギー Q と中心温度 Tc の関係の概念図。Q = -(M<sub>γ</sub> - M<sub>0</sub>) (「恒星内部構造論勉強会」集録(1964年)の佐藤の解説が出典)

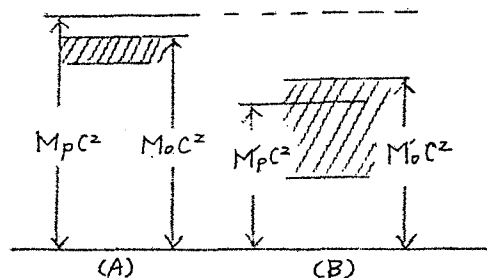


図3 固有静止質量 Mp と重力質量 M0 の関係。斜線部は内部エネルギー。原子核になった時の質量が M'p。(出典は図2と同じ)

である。そこにもってきて、電子・陽電子対が発生するとその静止質量分が Q にプラスに寄与するのである。すると図2に示してあるようにプラス・エネルギーの星になる。一見奇妙な結果であるが、必ずしもエネルギー保存とは矛盾しない。なぜなら、図3に示したように核子が原子核になって静止質量が下ることができるからである。しかし、その場合プラスエネルギーの上限もこの核エネルギーでおさえられることになる。

ともかく、一体こんな星は可能なのかということになる。これは安定性を考えるとありえなくなることを示したのがチャンドラセカールでした。

4. 不安定領域

ニュートン重力での不安定条件は

$$\int (\gamma - 4/3) \rho dV = (\bar{\gamma} - 4/3) \int \rho dV < 0$$

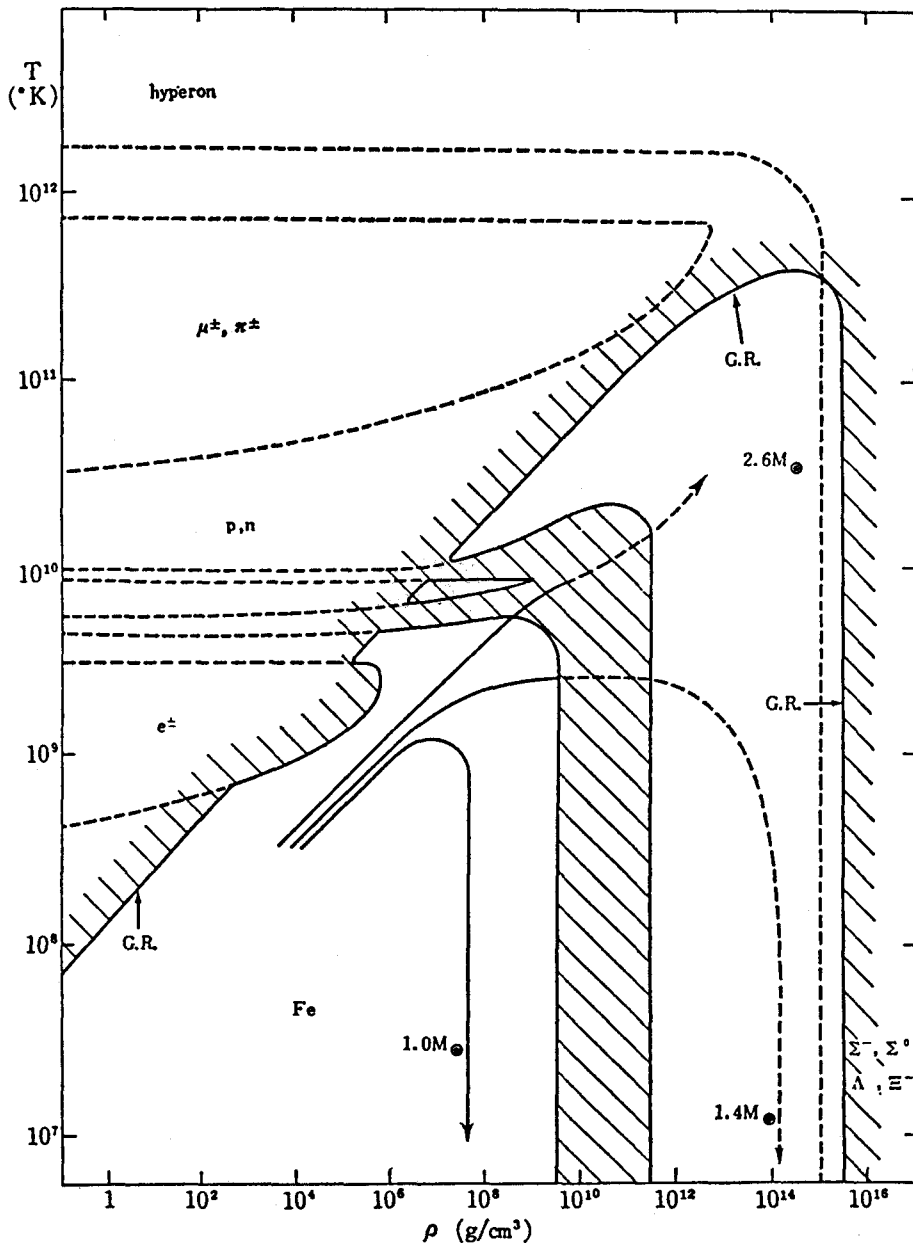
である。輻射優性なら  $\gamma$  は  $\gamma = 4/3 + \beta/6$  のように 4/3 に近いが  $(\gamma - 4/3) > 0$  だから不安定にはならない。チャンドラセカールが示したことは一般相対論の重力効果を摂動で取り入れて先の不安定条件を

$$\bar{\gamma} - \left( \frac{4}{3} + K \frac{r_g}{R} \right) < 0$$

と変えたことです。かっこ内の第2項は一般相対論の効果で  $r_g = 2GM/c^2$  は重力半径、 $K = 1.1$  は数係数。この項は小さいが  $\bar{\gamma}$  の 4/3 からのずれも小さいので、 $\beta \ll 1$  の星は不安定になるわけです。超重質量星については、その不安定性は対創生よりはるか手前でおこなることになる。

しかし、M を小さくすると不安定になる温度は結構大きくなり再び対ができる。その時は  $\gamma < 4/3$  となり、ニュートン重力でも不安定になるのである。私の学位論はこのあたりを分析したもので、その時に Tc - ρc 図上に不安定領域をはじめて図示した。特に e± 対発生にともなう不安定領域の図はそれまで一切なく初めてのものとあろう。

その後この不安定領域の図示はさらに内容が拡大された。図4は林先生が基礎物理学研究所 15 周年記念シンポジウムの際の講演で初めて示したものである。この図



高温高密度のガスの組成と星の不安定領域。

低温・低密度の熱平衡状態のガスは  $\text{Fe}^{56}$  電子から成るが、高温・高密度になると、まず  $\text{Fe}^{56}$  は核子（高温では  $p + n$ 、高密度では  $n$ ）に分解する。この分解の遷移領域（図の斜線領域）では  $\gamma$  の値は  $\frac{1}{3}$  より小さい。このほかに、電子対、中間子対の発生の遷移領域（図の  $e^\pm$ ,  $\mu^\pm$ ,  $\pi^\pm$  の点線で囲まれた領域）でも  $\gamma$  は  $\frac{1}{3}$  より小さい。さらに、図の G. R. で示した実線より高温、高密度の領域（やはり斜線で示してある）では、一般相対論の効果によって、星は不安定である。

図 4 出典は「基礎物理学の進展」の林忠四郎“星の進化”。(1968 年)

にてつは私もいろいろ討論させてもらった記憶がある。いまも実にスッキリした概念図である。この図の完成であれこれ先生に刺激を与え得たことを私は密かに誇りに思っています。

この不安定領域の図示は林先生のお気に入りであり、その後の星の進化の論文にはトレードマークのようによく書かれてあります。それを見る毎に私にはいささか気になることがある。それは  $e^*$  対の所の図がどれだけ正しいのか自分の計算に全く自信がないからです。多分、あとから誰かが計算機であつという間に再計算したものが用いられているのだろうと思うが、もし私の論文の引き写し（少なくとも Takarada et al. の論文ではそうである）なら冷汗ものである。私は数値計算はダメでこの時の  $\gamma$  の計算もチウか誰かの論文から 2, 3 点で微分を出すという強引なことをして出したものである。誰か後で再計算したのであろう不安定領域と私のとがどれだけ一致しているのか、いささかこわいので較べたことはない。ざっと見たところは一緒である。もっとも、あの領域はあくまで「概念図」であるから誰にも被害はないはずである。

## 5. 超重質量星を爆発させる方法？

核反応の温度よりも低温で不安定となるこの星を爆発させるのは無理である。そこで、回転を入れて不安定を押しえるとか考えられた。珍説としてはコア部分の質量がニュートリノで欠損し、重力が小さくなって envelope が飛ぶというものもあった。また、ホイルの定常宇宙論用の C-field 理論というのがあって、それを星に適用して爆発をさそうというものもあった。林先生はその頃 (1963~64 年) このいささかゲテものの理論に興味をもっていて、何か計算されておられたように記憶している。なんでも正統的に正面から問題を解いていかれるというのが先生のイメージになっているから、現在では想像しがたいことかも知れないが、当時はそれ程ゲテものにも見えなかった気がする。何しろ、まだ「定常宇宙」が正しいかも知れなかった時代である。

ともかく、超重質量星は爆発しないことがわかり、話題はブラックホールに移っていった。ブラックホールからエネルギーをどう取り出すか？ 現在は降着円盤であるが、それにいたるまでにはやや時間が必要であった。

天体観測専門誌

# 天文ガイド

10月号 定価450円+85 9月5日発売！

9月23日、秋分の日の日食  
写真撮影法など本格派の方向きガイド

島根県と広島市間の衛星中継  
「衛星通信で結ぶ宇宙のロマン」

ニューフェイス・テストレポート  
新型アイピース各種

星座早見兼用壁時計  
シチズンのコスモサイン技術者

天体写真テクニック  
カラー写真のプリント

- 10月のスター・ウォッチング ●10月の観測資料
- 観測ガイド ●情報ボックス…など情報満載！！

新刊・案内

## 新版 星座めぐり 春夏秋冬

多くの天文ファンを生んだ名著  
大好評発売中！ 定価1800円。

星座案内を、香り高い文学として完成させた、故・野尻抱影先生的不朽の名著！

あいつぐ空襲の間にかい間見た星空、荒廃した戦後の澄み切った星座を、敗戦前後の人人の星に寄せる想いを込め、格調高いエッセイとともに案内した「新星座めぐり」4分冊を1冊にまとめて復刻。

- 野尻抱影著
- 四六判/360ページ
- 定価1800円



誠文堂新光社

東京都千代田区神田錦町1-5  
電03(292)1221 振替東京7-128